

哈爾濱工業大學

畢業設計（論文）

題 目 基于迈克尔逊干涉仪  
的位移测量系统

专 业 测控技术与仪器

学 号 180220214

学 生 1802202

指 导 教 师 任秀云

答 辯 日 期 2022 年 6 月

## 摘 要

随着微电子等行业的发展，位移测量技术逐渐变为超精密加工与测量中的一项重要技术。本文设计了一种基于迈克尔逊干涉仪的位移测量系统，改善系统使用 He-Ne 激光器作为激光光源，使用迈克尔逊干涉仪，结合细分变相电路，实现了较高精度的位移测量。该测量系统通过使用两个光电二极管采集干涉圆环信号后，经过放大和整形处理，再使用单片机的计数器外设对整形后的信号进行计数处理。计算得出测量结果后，将测量结果显示在主板的屏幕上，同时使用单片机的串口外设将测量结果按特定格式发送给上位机完成测量。

首先，本文阐述了迈克尔逊干涉仪的工作原理，并推导了干涉圆环随着位移改变产生的变化，并以此为依据接着推算了实际计数值与产生位移之间的关系。随后依据推导结果，设计了基于 STM32F103C6T6 单片机的测量控制板和相应的上位机。

在选择了光电传感器，单片机与运算放大器后，设计了光电二极管对应的放大电路与可调阈值的整形电路。并使用 Proteus 对放大电路与整形电路进行了仿真测试。在结合了细分变辩向计数后，实现了对位移准确自动测量，基本避免了人为的计数错误。

搭建了测试系统，并使用该系统对压电陶瓷产生的位移进行测量和数据记录，在多次采集实验数据的基础上，对实验结果进行了严谨的分析，最后最终实现的基于迈克尔逊干涉仪的位移测量系统分辨率 79.1nm，测量精度 $\pm 137.82\text{nm}$ ，测量线性度 0.9957。最后本文给出了几种该系统可能存在的问题，与可能解决这些问题的解决方案，对未来进行了展望。

**关键词：**迈克尔逊干涉仪；细分辩向；位移测量；单片机；

## Abstract

With the development of microelectronics and other industries, displacement measurement technology has gradually become an important technology in ultra precision machining and measurement. In this paper, a displacement measurement system based on Michelson interferometer is designed. The improved system uses He Ne laser as the laser source, Michelson interferometer and subdivision phase transformation circuit to achieve high-precision displacement measurement. The measurement system uses two photodiodes to collect the interference ring signal, after amplification and shaping, and then uses the counter peripheral of the single chip microcomputer to count and process the shaped signal. After calculating the measurement results, the measurement results are displayed on the screen of the motherboard. At the same time, the serial port peripherals of the single chip microcomputer are used to send the measurement results to the upper computer in a specific format to complete the measurement.

Firstly, the working principle of Michelson interferometer is described, and the change of the interference ring with the change of displacement is deduced. Based on this, the relationship between the actual count value and the displacement is calculated. Then, according to the derivation results, the measurement control board and the corresponding upper computer based on stm32f103c6t6 single chip microcomputer are designed.

After choosing photoelectric sensor, single chip microcomputer and operational amplifier, the amplifying circuit corresponding to photodiode and the shaping circuit with adjustable threshold are designed. The amplification circuit and shaping circuit are simulated and tested by Proteus. With the combination of subdivision and variable direction counting, the accurate and automatic measurement of displacement is realized, and the artificial counting error is basically avoided.

The test system is built and used to measure and record the displacement generated by piezoelectric ceramics. Based on the experimental data collected for many times, the experimental results are carefully analyzed. Finally, the displacement measurement system based on Michelson interferometer has a resolution of 79.1nm, a measurement accuracy of  $\pm 137.82\text{nm}$  and a measurement linearity of 0.9957. Finally, this paper gives several possible problems of the system, and possible solutions to these problems, and prospects for the future.

**Keywords:** Michelson interferometer, Segmentation and distinguishing to the technology, displacement measurement, Microcontroller

# 目 录

摘要 .....	I
Abstract .....	II
<b>第 1 章 绪论</b>	
1.1 课题背景、的目的和意义 .....	1
1.2 国内外在位移测量方向的研究现状 .....	2
1.3 本文的主要研究内容 .....	5
<b>第 2 章 迈克尔逊干涉位移测量系统设计</b>	
2.1 引言 .....	7
2.2 测量系统设计方案 .....	7
2.3 迈克尔逊干涉原理 .....	8
2.4 迈克尔逊干涉仪测量原理 .....	10
2.4.1 干涉仪测位移原理 .....	10
2.4.2 细分辨向计数原理 .....	10
2.5 本章小结 .....	12
<b>第 3 章 系统设计</b>	
3.1 引言 .....	13
3.2 系统整体设计 .....	13
3.3 光路部分设计 .....	14
3.4 元件选型 .....	14
3.4.1 光电传感器选型 .....	14
3.4.2 屏幕选型 .....	15
3.4.3 单片机选型 .....	16
3.5 电路设计	
3.5.1 放大电路设计 .....	17
3.5.2 整形电路设计 .....	18
3.5.3 按键及稳压电路设计 .....	20
3.5.4 电路板设计 .....	20
3.6 程序设计 .....	22
3.6.1 显示屏程序设计 .....	22
3.6.2 系统整体程序设计 .....	23

---

3.7 本章小结 .....	24
<b>第 4 章 实验测试与结果分析</b>	
4.1 引言 .....	25
4.2 位移测量实验与数据处理 .....	25
4.3 系统误差分析与方法改进 .....	28
4.3.1 系统误差分析 .....	28
4.3.2 可能的改进方法 .....	29
4.4 本章小结 .....	29
<b>结论</b> .....	30
<b>原创性声明</b> .....	32
<b>参考文献</b> .....	33
<b>致谢</b> .....	35

# 第 1 章 绪论

## 1.1 研究背景、目的和意义

精密机械加工的基础是较高精度的位移测量技术。随着科技的发展，及高精度的位移测量技术越来越重要。在许多领域中，对微位移的测量方法与精度都有了要求。现在位移测量技术已经被应用于各行各业，不论是高铁、船只、汽车等方面的生产制造，还是在光学仪器、医疗仪器等的制造加工方面，位移测量技术都不可缺少，而且对测量的准确度的要求也越来越高，因为这将直接影响到产品的质量。

对于位移测量，按照是否接触可以分为接触式测量和非接触式测量。按照测量中使用的技术又可以分为机械、光学与电学测量法。接触式测量由于存在应力，且可能会对被测物体表面带来不可修复的损伤，而且接触式测量存在速度慢，精度低，由于存在磨损，还会有额外的保养维修成本。因此目前先进的测量方法均不是接触式测量。而非接触式测量不存在接触应力，因此逐渐成为主要发展方向。

目前在很多前沿项目中都使用到了位移测量技术，且其处于一个十分重要的地位。例如材料物理领域中，测量金属的膨胀系数，需要通过测量膨胀产生的位移大小来测出体积变化量，而这取决于位移测量的精度<sup>[1]</sup>。随着技术的发展，尺寸在及海米甚至更小的微机电系统发挥了越来越重要的作用，微机电系统广泛应用于许多领域，是一项关系到许多方面的关键技术该技术将会广泛应用于各个方面<sup>[2]</sup>。在芯片制造领域，由于芯片性能与芯片制造的精密程度，也就是芯片线宽直接相关，因此芯片制造的精度可以说是越高越好。在加工过程中明显芯片需要定位对准这一步骤，而对准的前提就是高精度的位移测量技术。芯片制造中使用的光刻机中的镜片位置也需要纳米级的测微技术来校订。在观察微观的仪器中，由于光学显微镜的理论分辨路不可能无限提高，现在已经逐渐被例如电子显微镜，扫描隧道显微镜等替代。如图 1-1 所示，位移传感器是新技术显微镜的一个重要组成部分。为了能完成更高精度的位移，势必要使用反馈控制技术，而反馈采集数据自然就需要位移传感器<sup>[1]</sup>。



图 1-1 新技术显微镜

通过测量位移可以实现许多其他量的测量。例如温度改变时，材料会对应的膨胀，若用已知膨胀系数的材料制作通道或将其当作位移输入，测量出其在温度改变时改变的长度，理论上即可算出此时环境对应的温度。例如 2019 年，西安工业大学的王欢等人就设计出了基于法布里-珀罗干涉仪的高分辨率光线温度传感器，且温度分辨率达到了 0.0002 摄氏度<sup>[3]</sup>，其系统结构如图 1-2 所示。使用类似的原理可以完成气压强度的测量，压力大小的测量等物理量的测量。

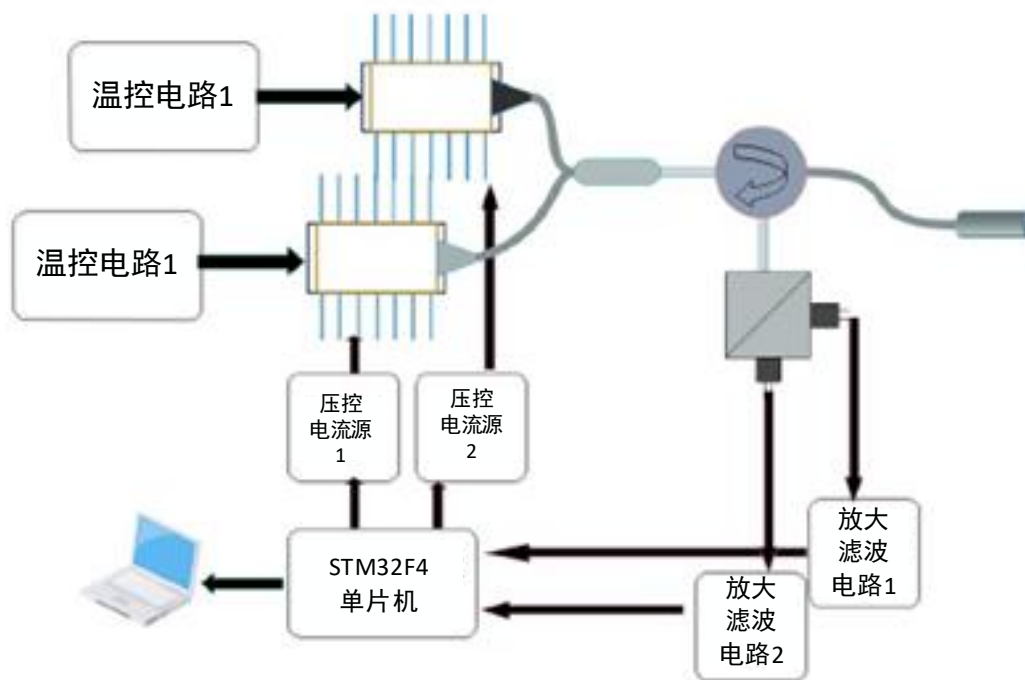


图 1-2 偏振式双波长调频连续波温度传感器系统结构图<sup>[3]</sup>

由此可见，众多科技领域的发展都依赖于微位移测量技术。基于迈克尔逊湮位移测量系统理论上能实现至少几十纳米的分辨率，而且有一定的抗干扰性能，例如，在测量平台产生震动时，测量结果几乎不会受到影响。

## 1.2 国内外在位移测量方向的研究现状

电容式位移传感器是位移测量技术中，目前最好用的技术之一。电容式位移传感器是通过测量两个极板间的电容大小，来间接计算出两个极板间的间距，从而得出当前动极板的位置，进而计算出唯一大小的。位移与电容间满足反比关系。这种位移传感器是一种非接触式位移传感器，而且其具有动态响应快，分辨率高等优点。德国 PhysikInstrument 公司生产的 P517、P527 系列电容传感器在两成达到 250um 的情况下，精度仍能达到 10nm，且分辨率可以达到 2nm，其产品如图 1-5 所示。

该公司生产的 D-510 系列电容位移传感器，分辨率有 0.4nm，频率相应为 10KHz，且测量范围可以达到 10nm。



图 1-3 P517 电容式位移传感器

而国外的基于干涉仪的位移测量技术发展同样迅速。单频激光干涉仪的历史悠久，现在应用单频激光干涉仪的技术已经非常多了。本设计中使用的干涉仪即为迈克学激光干涉仪，现在使用的许多干涉仪都是优化改进出来的。单频激光干涉仪测位移时基本利用组成干涉仪中的某个光学仪器，例如平面反射镜，在它产生位移时，干涉仪产生的干涉条纹会产生对应的变化，对干涉条纹的变化进行细分辨向处理后计数，通过推导位移与计数值间的关系，即可获得产生的位移。这也是恩设计使用的原理。图 1-4 所示即为一种改进型的单频激光干涉仪<sup>[4]</sup>。

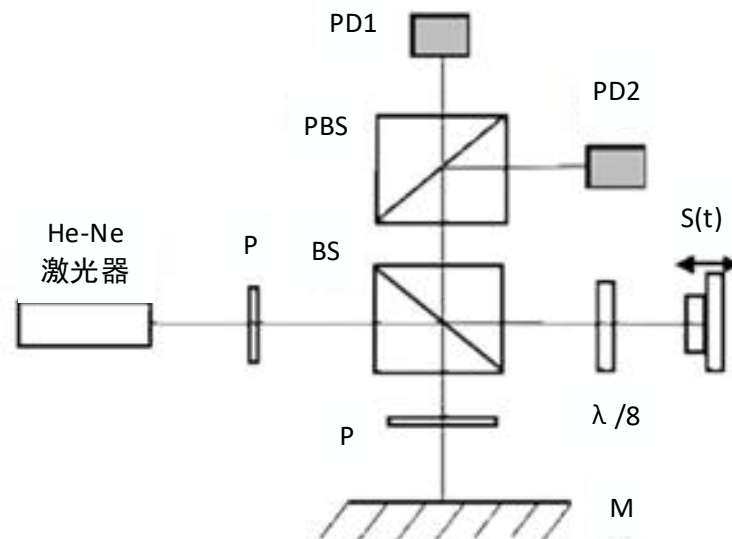


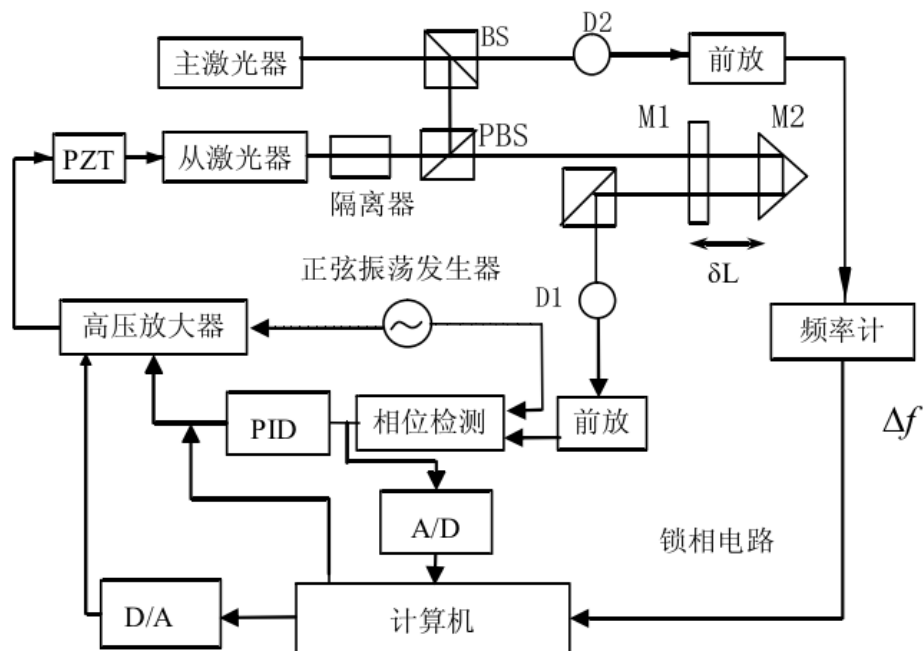
图 1-4 单频激光干涉仪原理示意图<sup>[5]</sup>

激光经过偏振片后变成两束垂直且相关的激光，他们相位信息相同且偏振方向呈九十度。通过分光棱镜 BS 后分成两路，一路经过反射镜 M，此光路为参考光



路。另一路经过动镜即测量镜反射，两路光在分光棱镜汇聚在一起，经过偏振分光棱镜分光后分成两束相位差为 90 度的光，分别由 PD1 与 PD2 两个光电传感器转化为电信号，处理后获得镜片的位移数据。单频激光干涉仪出现的非常早，而且很早就做出了对应的测位移装置。这种技术对测量过程中的速度变化的快慢没有限制，但是它存在非常多的存在较多的干扰因素，可能出现较大误差<sup>[5]</sup>。

使用激光作为光源的位移检测装置还有使用多束干涉原理，例如法布里-珀罗干涉仪。该干涉仪形成的干涉条纹非常尖锐，测量结果令人舒适。振幅可以法布里珀罗干涉仪通常是通过频率跟踪方法实现位移测量的<sup>[6]</sup>。其原理如图 1-5 所示，从激光器发出的激光，在镜子 M2 与 M1 组成的干涉腔内多次反射，形成峰值非常高的干涉条纹。可以通过控制 PZT 上加的电压来改变其位移，从而让从激光器震动起来，来让腔内输出保持最大值。在这种情况下，谐振模数变化为零，通过 PZT 的振动频率，与干涉仪的初始腔长，即可获得 M2 镜的位移量。



1-5 法布里-珀罗干涉仪原理示意图

此外，还有使用光栅来提高测量精度的传感器。例如 2015 年，浙江大学卢乾波等人<sup>[7]</sup>可以通过相位调制技术来提高输出信号的信噪比的位移测量装置，这种装置的光栅间隔距离是小于激光波长的，最终做出的位移传感器灵敏度与位移传感器分辨率都非常高。该位移传感器如图 1-6 所示。该传感器还采用了强度补偿计数，通过该技术可以提高输出信号的稳定性。在此之前，清华大学等人也研究制作出了一种分辨率达到 0.2nm 的使用集成衍射光栅的位移传感器。

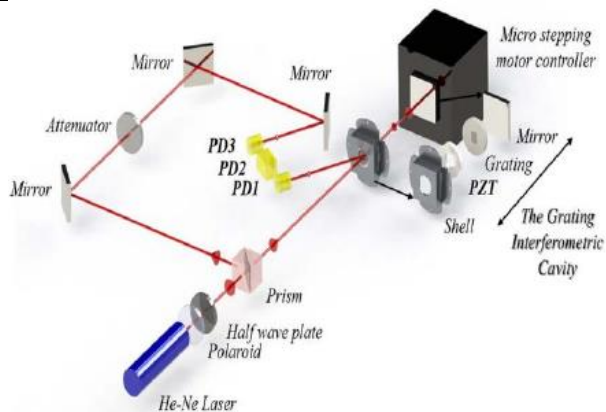


图 1-6 光栅位移传感器

2015 年，哈工大赵波<sup>[8]</sup>提出了一种位移测量系统，该位移测量系统时基于光栅双衍射的。如图 1-7 所示，信号变化的周期数和光栅移动距离成正比。在对光电传感器的接收到的信号进行细分等处理后，就可以获得光栅位移。实验结果表明，该系统的测量精度为 20nm。2019 年，哈工大对双衍射测量系统进行了分析。当光栅倾斜时，可以用技术手段让两个光束比较稳定的保持平行。从而该减少公差提高测量精度。

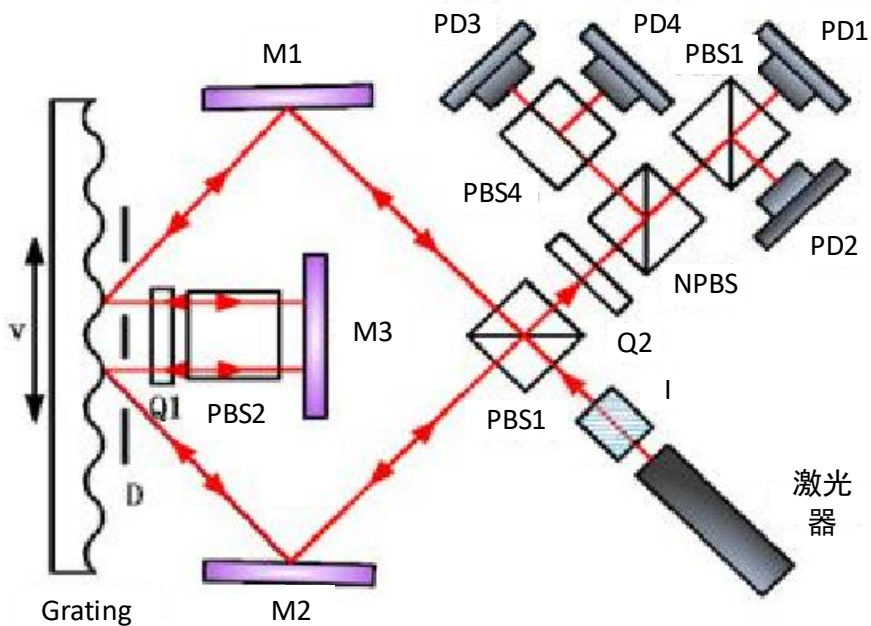


图 1-7 光栅位移测量系统的示意图

### 1.3 本文的主要研究内容

通过查阅大量国内外关于激光的位移测量技术和其他位移测量方法文献的基础上，阐述了本课题的可行性与必要性。

随后根据干涉条纹的变化情况决定了测量系统的设计方案以实现位移的高精度测量。由于光电传感器信号很小，本文为了提高测量精度，减少干扰，采用了集成式的方法提高了系统测量精度。利用上述技术设计了基于 ARM 公司的 STM32F103C6T6 单片机的迈克尔逊干涉仪位移测量系统，并制作了相应的上位机，实现了自动测量和自动显示结果的功能。

然后建立了基于迈克尔逊干涉仪进行位移测量的数学模型，随后在此基础上给出了测量系统的整体设计方案。并对测量系统的各个部分分别进行器件的选型与电路设计。最后根据测量结果标定了产生位移的压电陶瓷，分析了测量结果的误差大小与影响系统测量精度的主要因素。

## 第 2 章 迈克尔逊干涉位移测量系统设计

### 2.1 引言

本章主要阐述迈克尔逊干涉仪的原理，如何通过对干涉条纹进行计数来得到测量结果和计数中使用的细分辨向技术的基本原理。随后确定了迈克尔逊位移测量系统的整体设计方案。系统通过迈克尔逊干涉仪将位移变化转化为干涉条纹的变化，并通过两路光电二极管进行信号采集，并在运算后输出结果。

### 2.2 测量系统设计方案

设计的系统原理图如图 2-7 所示。系统可以分为光路部分和电路部分。光路部分即为迈克尔逊干涉仪。电路部分则包括放大整形部分和计数显示部分。光电传感器采用了两个光电二极管组成，放大整形部分则由运算放大器组成的放大电路和滞回比较器组成，信号处理部分与显示部分均在单片机中实现，显示部分在上位机上也有体现。

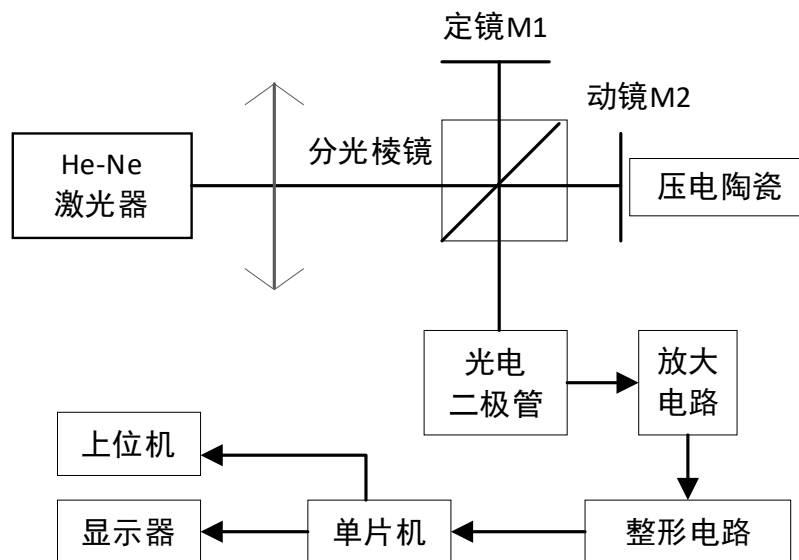


图 2-1 系统整体设计

具体原理和过程如下，在压电陶瓷上加电压的大小改变时，压电陶瓷长度因此改变，M2 镜也随之移动。照在两个光电二极管上的光强发生变化，在经过放大电路，整形电路后由单片机进行计数和处理，最后将单片机运算完成的结果显示在屏幕上并发送给上位机进行显示和处理。从而实现干涉仪测位移系统位移-光强-电信号的转换。

## 2.3 迈克尔逊干涉原理

干涉指两列或两列以上的波处于相同的空间位置时，出现的空间中各点光强度稳定现象<sup>[9]</sup>。为了产生稳定的光程差通常有两种方法：分振幅和分波面。分波面要求光源足够小，而分振幅可以使用光强较大的光源，能够获得明显的干涉条纹。迈克尔逊干涉仪就是一种把一束光的强度分成两部分的干涉仪。

为了研究光的传播是否通过某种介质，迈克尔逊干涉仪<sup>[10]</sup>在 1881 年被美国物理学家迈克尔逊设计出来的光学干涉仪器<sup>[2]</sup>。其基本结构如图 2-2 所示。

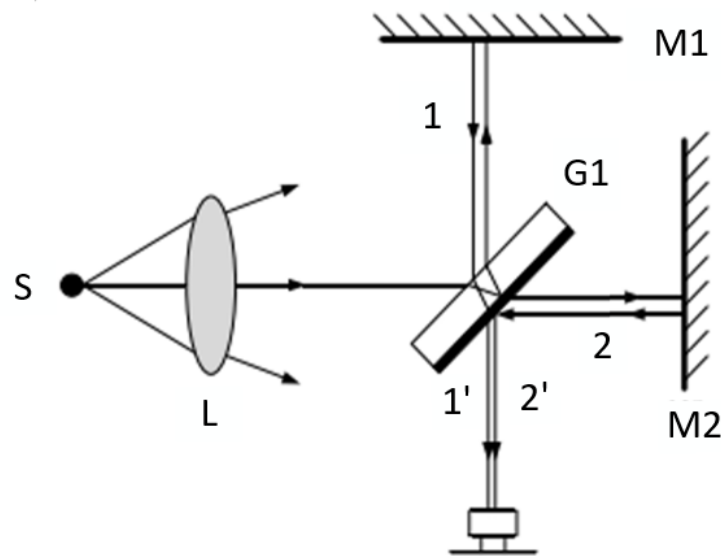


图 2-2 迈克尔逊干涉仪的基本结构和光路

图中 M1 与 M2 是两块垂直放置的镜子平面镜。G1 是一块玻璃板，但它的表面涂上了一层透射率反射率为 50/50 的半透半反射膜，它能让照射在上面的光形成两根强度相等的光线。最初的迈克尔逊干涉仪还有一个称为补偿板的 G2，用于补偿光线 2 的光程差<sup>[11]</sup>，但由于本设计不需要，因此图中未给出。

激光器 S 射出的光经过透镜或扩束镜 L，折射进入 G1 后，光线的一部分穿过 G1 被半透半反膜上反射。这部分光线沿着途中光线 1 的路径，被镜子 M1 反射后，第二次透过 G1 照射到接受屏上，为光线 1'。另一部分光线穿过半透半反射膜，被镜子 M2 反射经 G1 上的半透半反膜照射到观察屏上，即为图中的光线 2'。光线 1' 与光线 2' 有稳定的光程差，所以会在观察屏上形成稳定的干涉条纹。如果在光线 2 经过的地方放一个和 G1 厚度材质相同的玻璃板，计算光程差时就会方便许多，但是本设计包含了调整初始光程差的方法，因此不需要该玻璃板。

简化上述光路图，将带有半透半反射膜的 G1 化简掉，忽略由于 G1 厚度引起的

光程差，将光线 2 等效为光线 2' 的反向延长线，即可以得出如图 2-3 的模型。

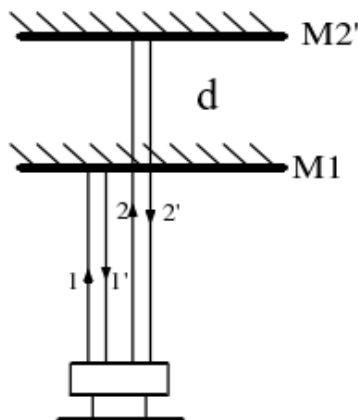


图 2-3 简化后的迈克尔逊干涉仪光路图

薄膜干涉中的光程差公式为

$$\delta = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} \quad (2-1)$$

式中  $i$  ——光线入射角（°）

$n_1$  ——薄膜上方材质折射率，通常为空气

$n_2$  ——薄膜折射率，无单位

$\lambda$  ——光的波仓（m）

$d$  ——薄膜厚度（m）

$\frac{\lambda}{2}$  ——反射带来的半波损失

应用在迈克尔逊干涉仪上时，两种介质都是空气， $n_1$  与  $n_2$  均取 1。由于  $\frac{\lambda}{2}$  表示反射带来的半波损失，在迈克尔逊干涉仪中可消去。带入式（2-1）可得迈克尔逊干涉仪的光程差为：

$$\delta = 2d \cos i \quad (2-2)$$

式中  $d$  ——M1 与 M2' 距离（m）

$i$  ——光线入射角（°）

$\delta$  ——迈克尔逊干涉仪光程差（m）

在 M1 与 M2 平行且不移动时，两个玻璃板间的间距  $d$  为常数，此时光程差只由入射角  $i$  决定。因此倾角相同时，光程差相等，故而会产生一圈圈的明暗相间的干涉条纹，该干涉条纹如图 2-4 所示。根据式（2-2）可以得出，两个镜

子间的等效距离  $d$  越小，干涉条纹越稀疏。

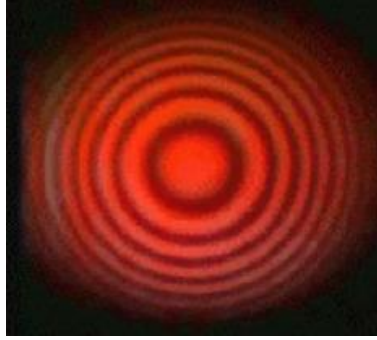


图 2-4 等倾干涉条纹图

## 2.4 迈克尔逊干涉仪测量原理

### 2.4.1 干涉仪测位移原理

干涉条纹中的明圆环均满足式（2-3），暗圆环均满足式（2-4）

$$\Delta\delta = 2d \cos i = 2n \frac{\lambda}{2} \quad (2-3)$$

$$\Delta\delta = 2d \cos i = (2n+1) \frac{\lambda}{2} \quad (2-4)$$

式中  $n$  ——取任意自然数

$\lambda$  ——激光波长（nm）

在固定 M1 镜，平移 M2 镜时，式（4-2）中的  $d$  会改变  $\Delta d$ ，干涉条纹也会收缩或向外扩张。当移动位移满足式（4-3）时，干涉条纹中心会完成一个周期的明暗变化。即如果两相干光的光程差是入射光半波长的偶数倍，最后会在接收屏上形成干涉亮条纹；相反，如果两相干光的光程差是入射光半波长的奇数倍，最后会在接收屏上形成干涉暗条纹。

$$\Delta\delta = \lambda = 2d \quad (2-5)$$

此时如果在干涉条纹中心放置一个光电传感器，该光电传感器接收到的信号也会随着干涉条纹中心光强改变而改变。在 M2 镜匀速产生  $\Delta d$  的位移时，光电传感器的信号理论上会按照正弦规律变化，且每变化一个周期时均满足  $\Delta d = \frac{\lambda}{2}$ 。只要经过波形变换将其变化为方波，再对方波计数，理论上就可以获得光电传感器按正弦规律变化的次数，且满足式（2-6），即可据此计算出位移量。

$$\Delta d = T \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2-6)$$

式中  $T$  为经过的周期数。

### 2.4.2 细分辨向计数原理

由于位移量存在正负，且根据上文，单个光电传感器不仅无法获得 M2 镜的运动方向，且在 M2 镜往复运动时会禅城重复计数，最终只能获得 M2 镜运动的路程，而无法获得位移。为了正确获取位移，我选择使用细分辨向技术。

细分辨向电路主要包括在一个周期中多次计数和分辨运动方向的功能，多次技术是通过对两路方波的沿计数实现的。分辨运动方向则是通过分析两路波的相位关系作为依据来完成的。由于难以根据根据单一信号进行辨向，因此选择使用两个光电传感器，来产生两路具有  $90^\circ$  相位差的信号，进行细分辨向。

通过调整两个光电传感器的位置，可以获得相位差近似为  $90^\circ$  的两路信号，M2 镜匀速正向移动与匀速反向移动时的波形图。两路信号分别用 A 与 B 代替，则正向与反向运动时的信号分别如图 2-5 与图 2-6 所示，图中包括了经过比较器整形后的方波信号。

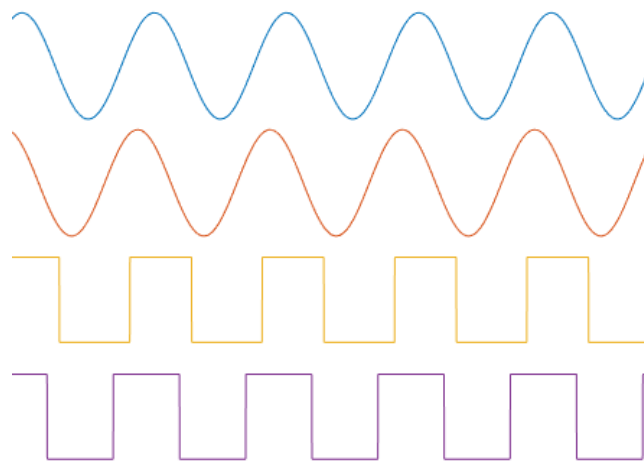


图 2-5 反向运动波形图

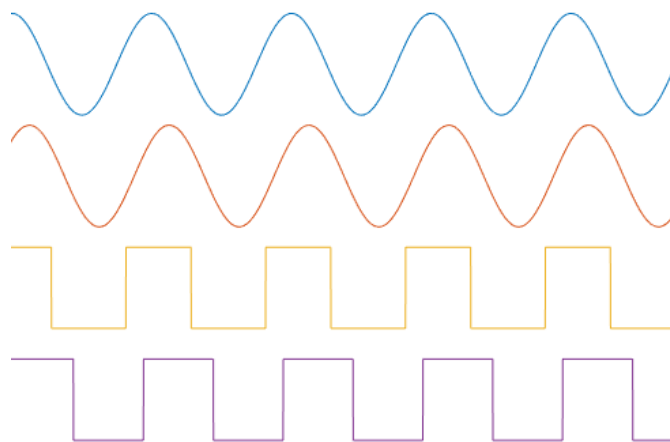


图 2-5 正向运动波形图

图中明显可以看总结出 AB 信号出现上升沿与下降沿时，另一路信号的电平状



态与运动方向的关系如表 2-1 所示。因此计数时只要按照表 2-2 所示规律进行正交解码，即可获得如图 2-6 所示的计数效果，明显可以看出该方法可以实现辩向功能，且拥有在每个周期可以实现四次计数的细分功能。

表 2-1 信号电平与运动方向的关系

运动方向	信号 A		信号 B	
	上升沿	下降沿	上升沿	下降沿
正向	B 低电平	B 高电平	A 高电平	A 低电平
反向	B 高电平	B 低电平	A 低电平	A 高电平

表 2-2 信号电平与运动方向的关系

相对信号电平	信号 A		信号 B	
	上升沿	下降沿	上升沿	下降沿
高	向下计数	向上计数	向下计数	向上计数
低	向上计数	向下计数	向上计数	向下计数

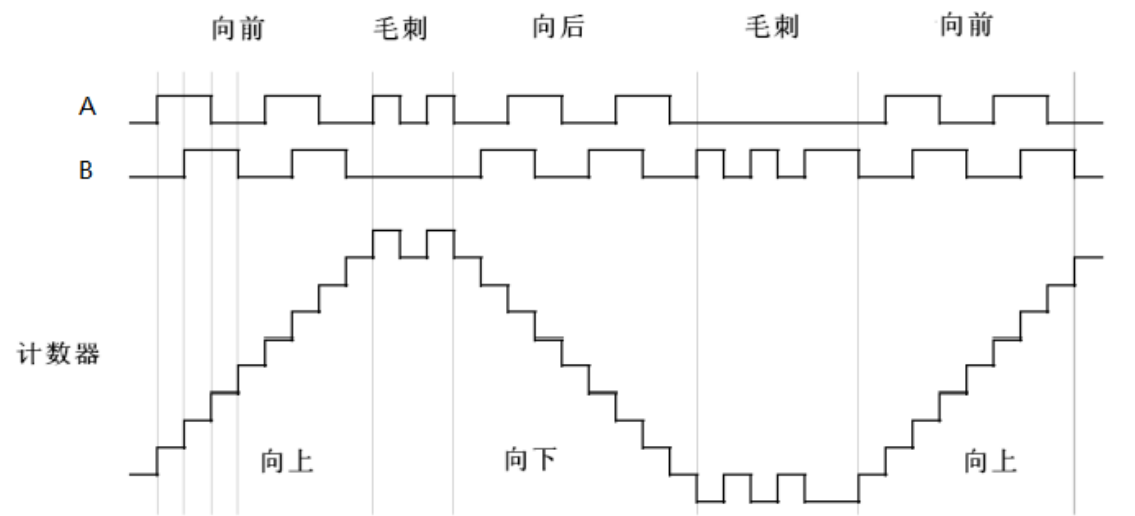


图 2-6 正交解码计数效果

## 2.5 本章小结

本章主要阐述了迈克尔逊干涉仪的测量位移的基本原理和四细分辩向计数的原理。并推导计算了计数结果与产生位移量之间的关系。此外，还简要阐述了系统的主要构成部分和信号处理的大致流程，并给出了系统的整体设计方案与整体设计框图。

## 第 3 章 系统设计

### 3.1 引言

本章主要阐述光路部分设计与电路部分的设计。包括激光光源的选择，光电传感器与电路中其他元器件的选型。设计了放大倍数合适的放大电路，阈值合适的滞回比较电路即整形电路，选择了合适该系统的单片机与显示器。并阐述系统的硬件电路设计思路，对电路的各个模块进行详细分析。

### 3.2 系统整体设计

系统整体结构图如图 3-1 所示。其中虚线框为 STM32F103C6T6 单片机。框内的计数器、串口与引脚均为片上外设，官方名称为 TIM、USART 与 GPIO。图中光电二极管、放大电路与滞回比较器均为两个，整个系统的位移输入方式是通过改变压电陶瓷两端的电压来使压电陶瓷伸长或缩短来产生位移。

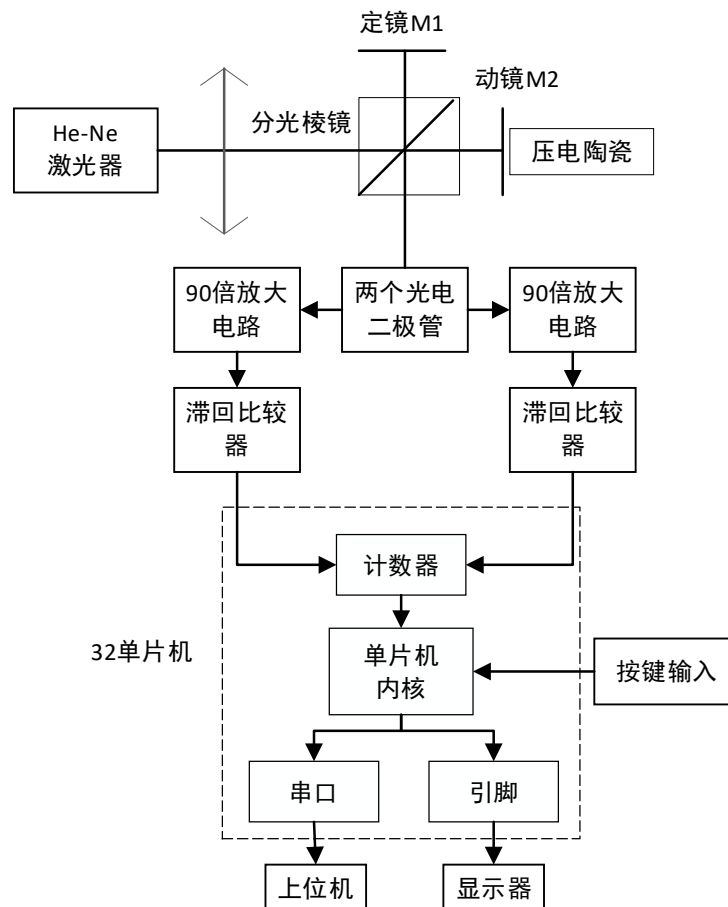


图 3-1 系统整体逻辑框图

### 3.3 光路部分设计

常用的激光光源包括固体激光器<sup>[12]</sup>，半导体激光器，气体激光器。在主要考虑了价格因素后选择了教学使用的 He-Ne 激光器，其发出激光波长为 632.8nm。此激光器在输出稳定性，光相干性，输出功率上都符合迈克尔逊干涉仪的具体要求。

分光元件可以使用分光片或分光棱镜，虽然分光棱镜价格较贵，但是因为实测分光片产生的干涉条纹效果不好，因此分光元件选择分光棱镜。

由于 M1 与 M2 镜均需要调整角度来产生干涉条纹和调整干涉条纹中心位置，因此 M1 与 M2 镜均放在二维调整架上。由于还需要粗调光程差来调整干涉条纹光斑大小，因此将 M2 镜的二维调整架放在二轴移动平台上，方便调整镜片位置与光程差。最终的光路实物图如图 3-2 所示。分光棱镜同样放置在水平的二位调整架上方便调整角度。

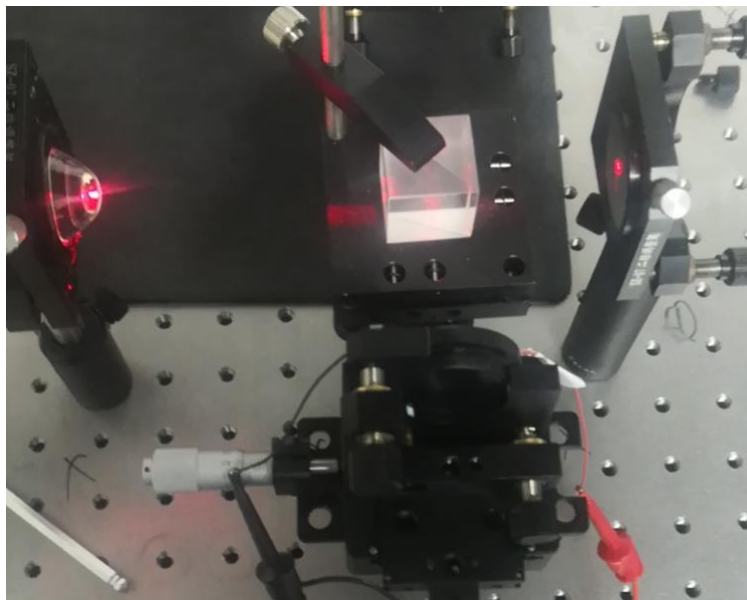


图 3-2 迈克尔逊干涉仪实物图

### 3.4 元件选型

#### 3.4.1 光电传感器选型

光电传感器一种将光信号转化为电信号的传感器。可以分为光电倍增管，光电二级滚，光导探测器，电耦合眼见等。在查阅了常用且价格较低的光电传感器后，初步确定了硅光电池 2DU6 与光电二极管 SFH203P。表 3-1 是 2DU6 与 SFH203P 与光有关的参数表。这两种元件在光谱范围等其他参数均合适，但测量干涉条纹时若感光面积过大可能会无法分辨暗条纹与明条纹，因此最终选择了 SFH203P 作为光电传感器。

表 3-1 光电传感器参数表			
参数	符号	SFH203P	2DU6
光谱范围	$\lambda$	400nm-1100nm	300nm-1000nm
最大感光波长	$\lambda_{S\max}$	700nm	850nm
光敏面积	$L \times W$	6mm*6mm	1mm*1mm

该光电二极管在串联 10k 欧姆大小的电阻并加 5v 电压后，通过光电二极管的电流大小在一定范围内与照在光电二极管上的光强关系如图 3-3 所示，图中  $V_O$  为开路电压， $I_P$  为上述条件下的光电流。

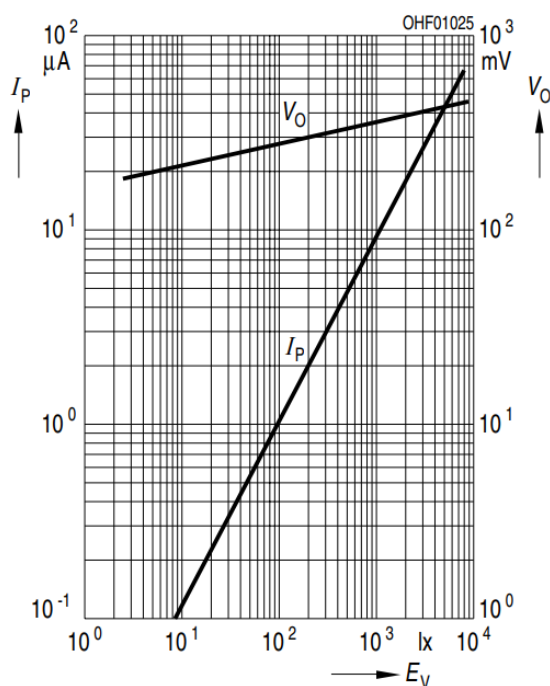


图 3-3 光电二极管光电流与开路电压

### 3.4.2 屏幕选型

首先选择显示屏，屏幕在此设计中的作用是显示系统当前状态，显示调试结果，因此选择便宜好用的黑白 OLED 显示屏即可，最终选择了 12864OLED 显示屏，该显示屏价格便宜，有 128x64 个像素点，能显示足够的信息。该显示屏使用 SSD1306 驱动芯片。该驱动芯片尺寸小，3.3V 就可以工作，而且支持多种通信协议。四线的 SPI，两线的 IIC 或者并行的 8080 均可。

由于该屏幕模块有多种型号，由于上述协议中 I2C 协议实现最简单，因此选择了使用 IIC 协议的 OLED 模块，该模块外观图如图 3-4 所示。该模块的四个引脚作用如表 3-2 所示。



图 3-4 12864OLED 外观图

表 3-1 显示模块引脚用途表

编号	符号	引脚说明
引脚 1	GND	信号地与供电地
引脚 2	VCC	3.3V 供电引脚
引脚 3	SCL	IIC 协议时钟
引脚 4	SDA	IIC 协议数据

### 3.4.3 单片机选型

随后选择单片机，单片机需要正交解码计数功能和至少实现一种能控制 OLED 的通信协议，且最好拥有串行口外设用于向上位机发送信息。若选择单独的通信芯片来分别实现计数与通信功能，主板和程序都会比较复杂。因此挑选了芯片自带多种外设的 STM32F103。该系列芯片包含两个 12 位的 ADC，两个 I2C 接口，两个 SPI 接口 3 个 UART 接口，三个通用十六定时器，一个 USB 接口和一个 CAN 接口。且芯片的供电电压低，范围宽，2.0V-3.6V 之间均可。而且该芯片可在宽温度范围内工作。最重要的是芯片的价格便宜。在该系列芯片中选择了容量足够而且足够便宜的 STM32F103C6T6 芯片。最后选择的最小系统板如图 3-5 所示。该最小系统板上带有 BOOT 电路、复位电路、单片机晶振电路，并将 USB 接口和 STLink 下载接口引出，还带有一个供电指示灯和一个自定义指示灯。

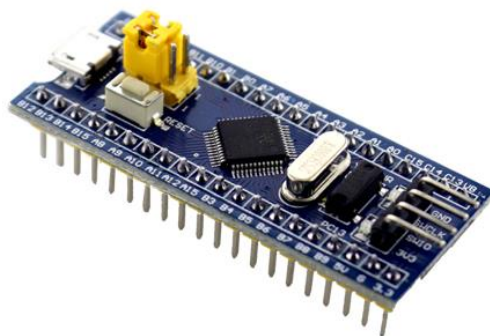


图 3-5 最小系统板实物图

单片机需要对应配套的时钟电路、下载电路等，而且芯片较小不易手动焊接，因此该系统使用了成品核心板。虽然最小系统板在信号频率较高时不易保证信号完整性，但由于该系统的信号不存在高频信号，因此不会遇到此问题。而且使用最小系统板可以在设计结束后对其进行回收，节省资金。

### 3.5 电路设计

#### 3.5.1 放大电路设计

上文光电传感器选择了 SFH203P 型号的光电二极管，需要对光电二极管信号进行放大整形处理。由于没有比较特殊的要求，因此运放选择常见的 LM324N。

LM324N 是一种非常常用的运算放大器，该芯片内部集成了四个互相独立，胡不用想的运放。且该运放在两个电源引脚间电位差 3v-32v 的范围内均能正常工作。虽然该运放的各项参数不是那么优秀，例如电压上升速度只有几伏特每微秒，但这已经能够满足本毕设中放大电路的设计要求。而且该运放可以在环境温度 0~70 摄氏度范围内正常工作。LM324 的引脚图如图 3-6 所示。

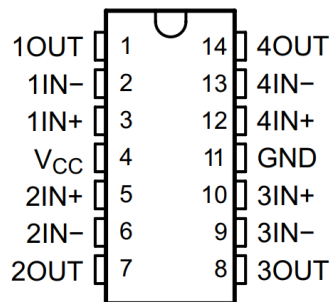


图 3-6LM324 运算放大器引脚图

设计好的 I-U 放大电路如图 3-7 所示。当照射在 LED1 上的光强变大时，通过 LED 的电流会相应变大，电阻 R4 上的电压也会相应变大，且由于 R4 上的电压很小，大约几十毫伏，该电压改变几乎不会影响光电二极管的工作状态。后续电路则是由运放组成了一个同向电压放大电路用于放大 R4 上的电压。电阻 R5 是为了进行运放的阻抗匹配，因此应满足  $R_1 = R_5$ 。

经过计算，该电路输出电压与经过光电二极管的光电流的关系为：

$$U_o = I_L R_4 \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \quad (3-1)$$

式中：  $U_o$ ——运算放大器输出电压（V）

$I_L$ ——通过光电二极管 SFH203P 的电流大小（A）

$R_x$ ——D 电阻 RX 的阻值（ $\Omega$ ）

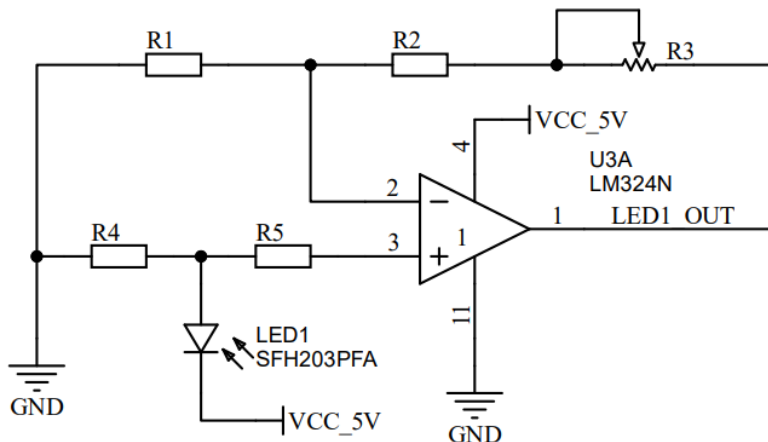


图 3-7 放大电路

在环境暗光的情况下，干涉条中心照射在光电二极管 SFH203P 上时光电流范围大约为 0 - 2uA。由于后续需要对放大后的电压进行整形处理，而且可能会对其进行 ADC 采集，因此放大到 0 ~ 3.6V 较为合适。因此该电路的放大倍数取  $10^6$  左右即可，且需要在一定范围内可调，即满足

$$R_4 \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} = 10^6 \quad (3-2)$$

R4 与后续放大倍数均不宜过大，同时考虑到电阻阻值均需要为常见阻值且放大倍数需要较宽范围内可调，因此最终取  $R_1 = 50k\Omega$ ， $R_1 = R_5 = 1k\Omega$ ， $R_2 = 33k\Omega$ ， $R_3 = 100k\Omega$ ，此时理论上放大倍数在  $1.65 \times 10^6 \sim 6.65 \times 10^6$  之间可调。

### 3.5.2 整形电路设计

整形电路需要将正弦波转为方波电路，因此理论上使用比较器即可，但放大后的信号可能噪声较大，因此需要使用滞回比较器，而且滞回比较器的两个阈值电压均应可以控制。且比较器输出的方波需要送到单片机计数器内进行计数处理，因此输出电压不能超过 3.3V 烧坏单片机。最终采用的整形电路如图 3-8 所示。图中 R1-R3 用来调节滞回比较器阈值电压，R4 与 R5 用来降低输出电压到 3.3v 以下。

经过简单推导，该电路阈值电压满足式 (3-3)

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)U_T = \frac{1}{R_3}U_o + \frac{1}{R_1}U_{VCC} \quad (3-3)$$

式中： $U_T$ ——阈值电压（V）

$U_o$ ——运算放大器输出电压（V），值为 3.7V 或 0V

$U_{VCC}$  ——电源电压，值为 5V

经过计算，较高阈值与较低阈值分别为式（3-4）与式（3-5）

$$U_{TL} = \frac{R_2 // R_3}{R_1 + R_2 // R_3} \times 5V \quad (3-4)$$

$$U_{TH} = \frac{R_1 // R_2}{R_3 + R_1 // R_2} \times 3.6V + U_{TL} \quad (3-5)$$

式中： $R_2 // R_3$  ——电阻 R2 并联 R3 的阻值（ $\Omega$ ）

$U_{TL}$  ——低阈值（V）

$U_{TH}$  ——高阈值（V）

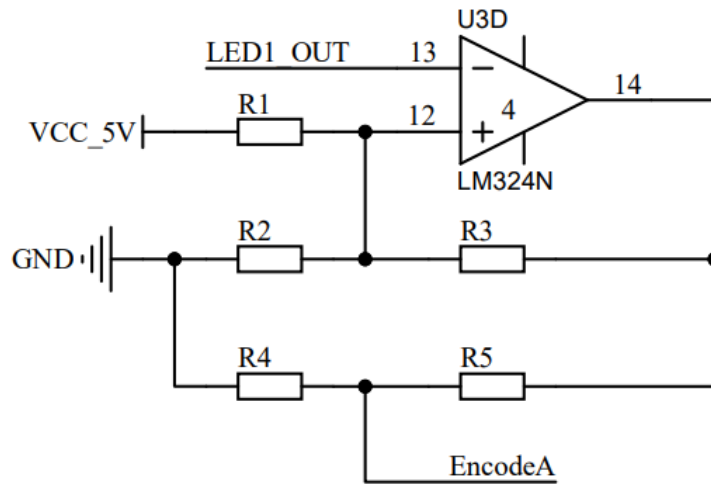


图 3-8 整形电路原理图

根据需要， $U_{TL}$  与  $U_{TH}$  分别取 1.8V 与 2.4V。经过计算，选取了合适的电阻阻值 R1 取 61K，R2 取 51K，R3 取 150K。由于 LM324 运放在 5V 供电下的最大输出为 3.7V 左右，为了防止烧坏单片机，有多种保护电路可以选择，最典型的的就是双二极管式的保护电路。将输入单片机的电压通过两个二极管分别连接到地电平与 3.3V 电平，此时两个二极管均工作在反偏状态。在二极管烧坏前可以保证输入电压一直保持在 0V~3.3V 的范围内，从而保护单片机输入引脚。但此方法需要使用两个二极管，且二极管存在压降，因此电压变化范围比 0V~3.3V 的范围更小，可能会导致后续计数出现问题。因此未选择此种保护电路。

考虑到运放在正常工作状态下输出一定在 0V~3.7V 范围内，使用两个电阻分压可以保证输出在 0V~3.3V 范围内。而且单片机在将输入模式调整到浮空输入模式时的输入阻抗有兆欧级别，因此可以认为分压后的电压即为输入单片机的有效电



压。为了成功保护，两个电阻大小应满足式（3-6）

$$U_o \frac{R_4}{R_4 + R_5} < 3.3V \quad (3-6)$$

式中： $U_o$  为运放输出电压，取值范围 0V~3.7V

在满足式（3-6）的条件下， $R_4$  与  $R_5$  如果取的过小，会导致运放输出电流过大，输出结果错误。综合考虑后最终选择  $R_4$  取 68K， $R_5$  取 10K，能保证在输出不超过 3.8V 时单片机的安全。且 3.7V 时经过此支路的电流仅有五十微安左右，不会影响运放输出结果。经过仿真测试，放大电路与整形电路均符合要求。

### 3.5.3 按键及稳压电路设计

整个主板采用单 5V 电源供电，使用 AMS1117-3.3V 线性稳压芯片产生主板使用的 3.3V 电压，给显示屏和按键供电，稳压电路如图 3-9 所示。按键则均使用了并联电容的上拉式设计，提高按键的稳定性。按键的电路设计如图 3-10 所示。

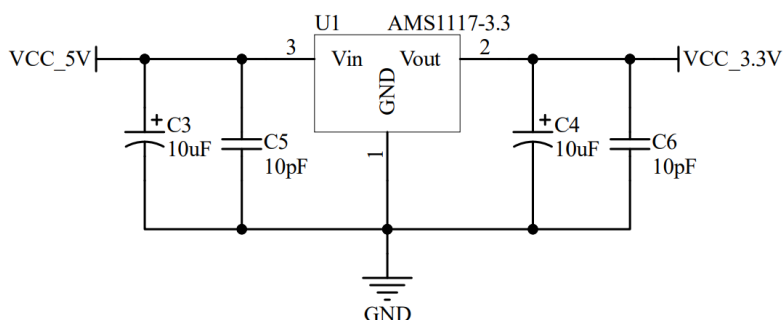


图 3-9 稳压电路

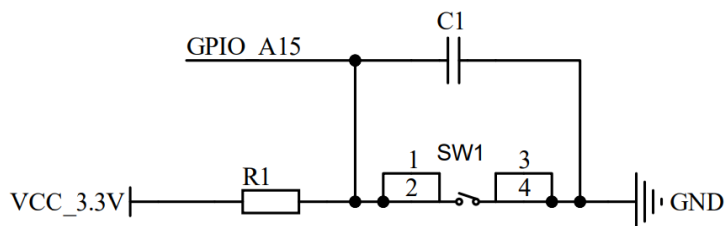


图 3-10 按键电路设计

### 3.5.4 电路板设计

由于主板需要固定在光学平台上，因此主板上除了上述设计内容外，还有三个按光学平台孔位分布的 6mm 直径固定孔。设计完成的电路板隐藏铺铜后如图 3-8 所示。主板采用的供电方式是使用学生电源的 5v 供电或 microUSB 接口供电，且主板上未设计防反接电路。

在电路板中还加入了如下设计，首先是 5V 与 3.3V 电源指示灯，使用两个 LED

指示，如图 3-11 所示。该设计可以让人直观的看出电路板是否供电，辅助排除其他可能的问题。还加入了如图 3-12 所示的电源滤波电路，防止在供电时电源纹波过大对主板上的电路造成损害。最后使用的电路板原理图如图 3-13 所示，电路板实物图如图 3-14 所示。

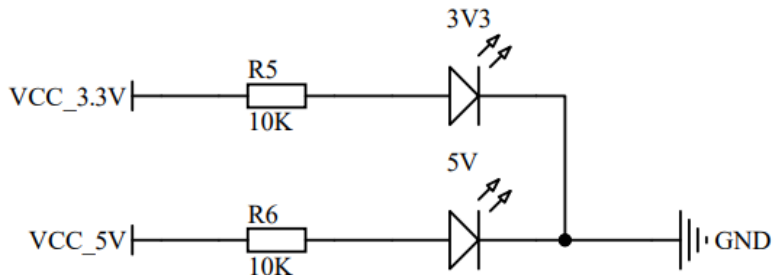


图 3-11 电源指示灯

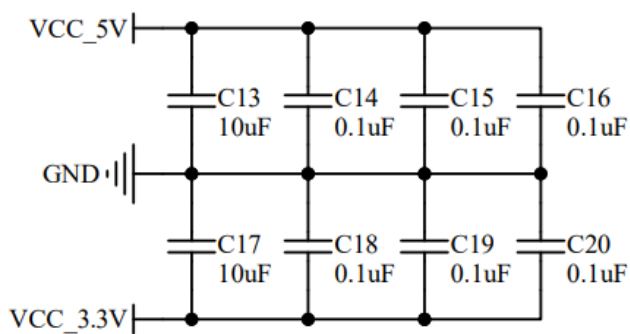


图 3-12 电源滤波电路

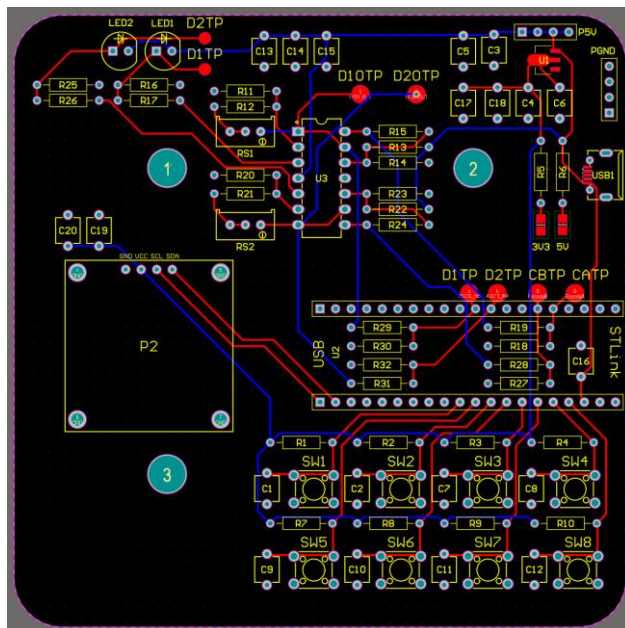


图 3-13 电路板设计图

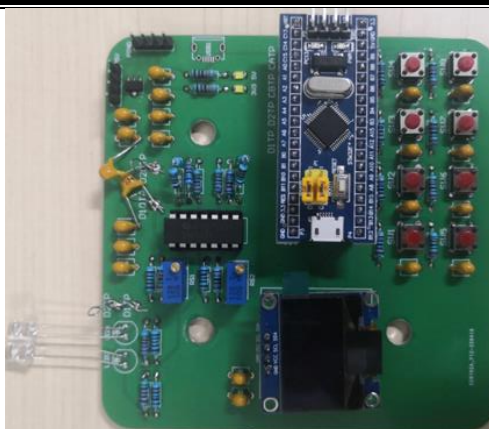


图 3-14 电路板实物

## 3.6 程序设计

### 3.6.1 显示屏程序设计

显示部分的控制较为简单，由于采用单片机且需要显示的内容很简单，因此没有设计显存。仅实现了初始化函数，显示位置设定函数与显示内容发送函数，具体函数实现方式可以查阅 SSD1306 芯片手册中的 IIC 通信协议部分。首先实现了 8x16 分辨率的字符显示函数。为了显示字符，单片机中以数组形式保存了所有可显示字符的位图表，显示时读取位图表内容后按通讯协议将内容发送给显示屏即可。字符串显示函数则是调用了字符显示函数，而数字显示函数又调用了字符串显示函数。上述三个函数的实现逻辑如图 3-15 所示。

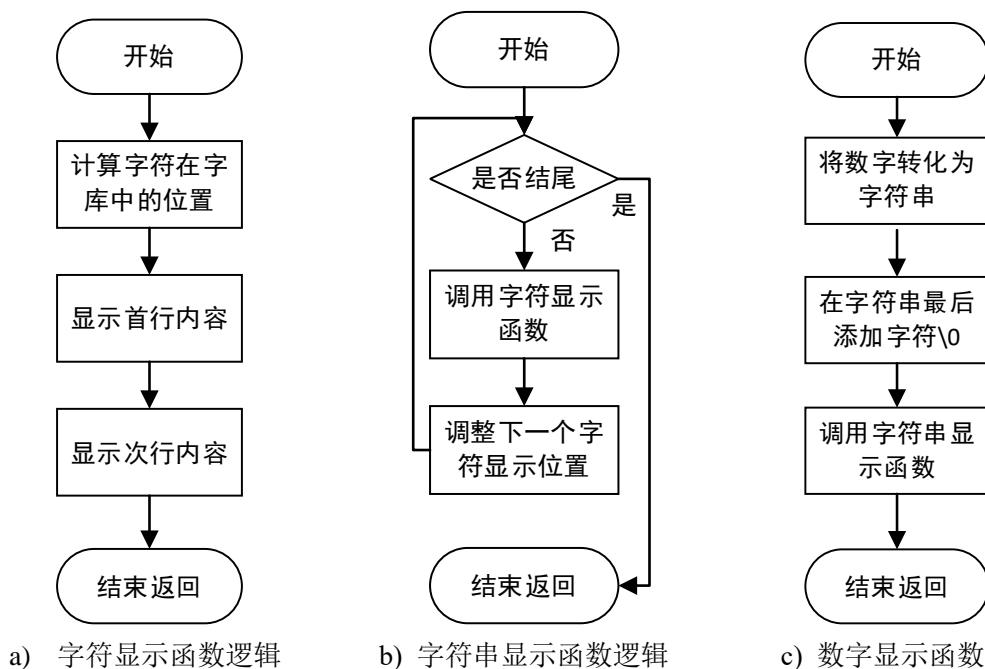


图 3-15 显示屏控制逻辑图

### 3.6.2 系统整体程序设计

主函数需要完成计数的读取，测量结果的运算、显示与发送。测量开始等控制功能是通过按键输入来实现的。其主要流程图如图 3-16 所示。其中显示屏的控制是通过两个 GPIO 模拟 IIC 通信实现的，为了提高程序的可移植性且降低出错率，因此没有选择使用片内 IIC 模块实现，而且使用 IIC 模块实现还有一个坏处就是引脚相对固定，不易更改。按键输入则使用片上外设 GPIO，对细分后的信号计数则使用单片机内部的 TIM2 计数器的编码器计数模式实现的。

为了方便调试，还使用了 ADC1 的两个输入通道对放大后的输出值进行 AD 转换并显示在屏幕上。后续可能可以通过采集到的计数值来得到更精确的位移量，但由于本系统的放大倍数并非固定值，而是随着环境光变化，放大倍数也会做出对应的调整，因此该功能暂无法实现。为了调试正交解码功能，通过单片机上的 TIM3 计数器产生了两路可调频率的正交方波信号，可以在核心板未安装到主板上时，通过杜邦线连接的方式进行单片机计数部分的性能测试。

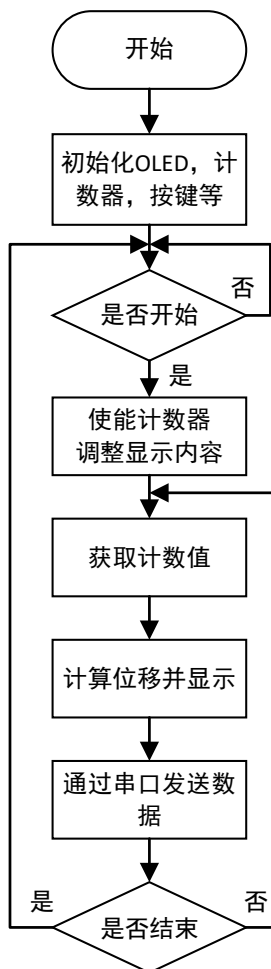


图 3-16 主函数流程图

### 3.7 本章小结

本章首先给出了整个测量系统的整体逻辑框图，随后完成了光路的搭建、完成了光电传感器、屏幕、单片机型号与稳压芯片的选择。设计了合适的放大电路与整形电路，并对设计好的放大电路与整形电路使用软件进行了仿真测试。并以此为依据，在加入电源指示灯、电源滤波电容等电路必须的部分后，制作了测量使用的电路板，并焊接了电路板实物。在电路板完成后，阐述了下位机的程序设计内容，说明了单片机中外设部分的使用情况。

## 第 4 章 实验测试与结果分析

### 4.1 引言

前面章节已经阐述了测量原理、完成了硬件选型、电路板的设计和上位机程序的编写，并完成了电路的焊接。本章将通过使用位移测量系统来标定压电陶瓷的压电常数来获取位移测量系统的实验数据，完成对系统进行性能测试，包括重复性实验、稳定性实验与抗干扰测试实验。并对实验数据进行处理和误差分析，获得线性度，极限误差等数据。

### 4.2 位移测量实验与数据处理

在进行测量时，实验室温度为夏季室温 20℃-35℃，具体实验步骤如下：

（1）固定核心板，调整核心板和凸透镜，使一号光电二极管位于凸透镜光斑中心，且光电二极管应正对于激光来源的方向。

（2）撤去凸透镜或扩束镜，在核心板前放置一白板，将 M1 与 M2 镜反射的两个最亮的光点调整到同一个位置。

（3）放回凸透镜，微调 M1 镜与主板位置，将干涉条纹中心调整至光电二极管。调整基础光程差，即调整干涉圆环大小，使系统可以正常计数，具体表现为震动光学平台，计数结果不改变。

（4）调整压电陶瓷上的电压，此时可以在上位机看到位移的变化情况，如图 4-1 即为一次电压 0x-100v-0v 时记录的位移变化曲线，图中纵轴为位移量，单位 nm。

（5）调整压电陶瓷上的电压，并记录在计数值改变时压电陶瓷上的电压。

经过多次独立重复上述实验过程后，记录到多组数据，如表 4-1 即为某三次实验中记录的实验数据。随后使用最小二乘法式（4-1）拟合即可获得压电陶瓷的压电常数。

$$k = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4-1)$$

式中：n——总测量次数

i ——第 i 组测量的电压-位移数据

$x_i$ ——第 i 次测量记录的电压值（V）

$y_i$ ——第 i 次测量时的位移量（nm）

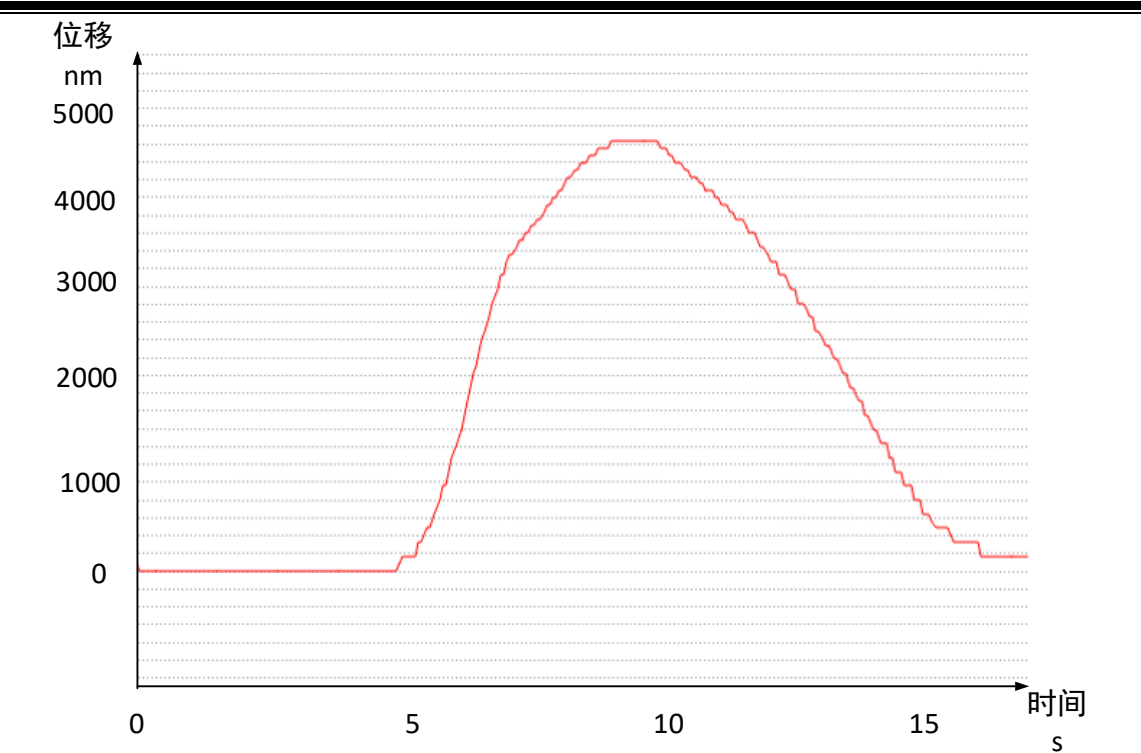


图 4-1 位移变化曲线

表 4-1 记录的实验数据

计数值	理论位移 (nm)	对应的电压值 (V)					
		第一次实验		第二次实验		第三次实验	
		正行程	负行程	正行程	负行程	正行程	负行程
0	0	0	0	0	0	0	0
1	79.1	2.3	2.0	1.4	2.2	2.1	2.0
2	158.2	3.0	3.4	3.2	3.6	3.1	3.4
3	237.3	7.5	4.4	6.5	4.6	7.1	4.6
4	316.4	9.5	6.5	7.9	6.5	8.6	6.5
5	395.5	10.5	9.7	9.2	7.9	9.8	8.8
6	474.6	11.7	11.5	10.4	10.8	11.0	11.2
7	553.7	14.5	13.5	12.6	12.2	13.5	12.8
8	632.8	16.7	15.2	15.5	14.3	16.0	14.8
9	711.9	17.6	16.4	16.6	15.7	17.1	16.0
10	791.0	18.9	19.2	17.6	18.7	18.3	19.0
11	870.1	21.7	21.5	20.6	21.0	20.9	21.3
12	949.2	23.5	23.3	22.3	22.7	23.0	23.0

为验证本文设计的迈克尔逊干涉仪位移测量系统的测量结果是否准确，对上述

实验数据进行处理。0-1000nm 位移实验的实验数据如图 4-2 所示，由于数据过多会使图可读性下降，因此在图中仅以散点形式给出两组数据。

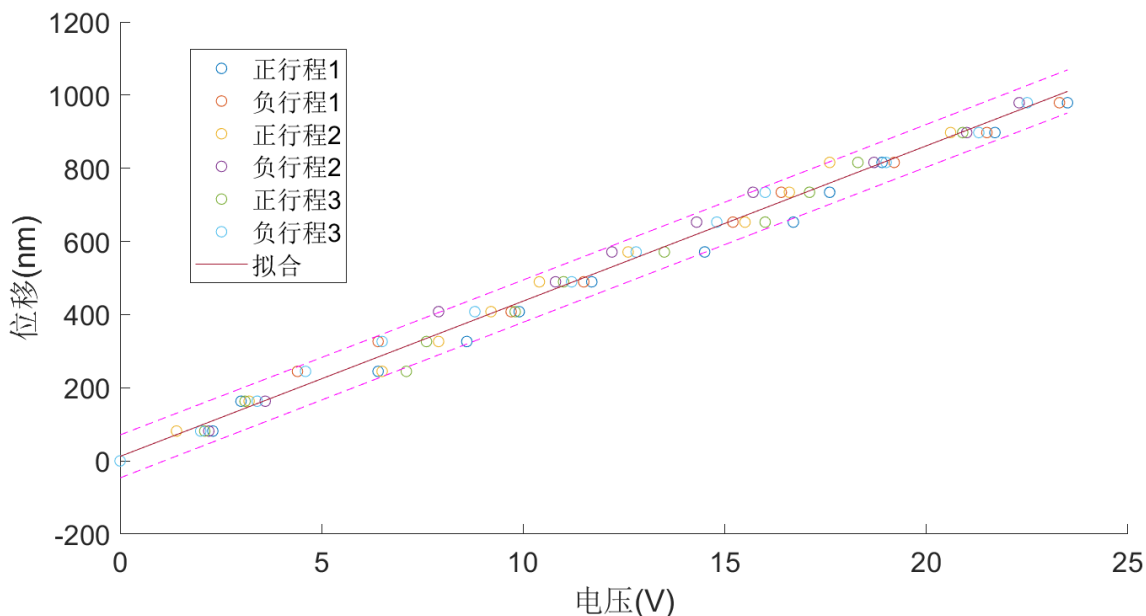


图 4-2 位移实验数据

图 4-2 中两道粉色的线为拟合出的直线 $\pm 2\sigma$ 获得的两条直线，实验结果数据可以认为均位于两道粉色线内，因此可以认为实验误差大小为 $\pm 2\sigma$ 。测量结果的误差如图 4-3 所示，图中每个颜色为一次独立测量，可以看出四次测量的误差基本呈随机分布。

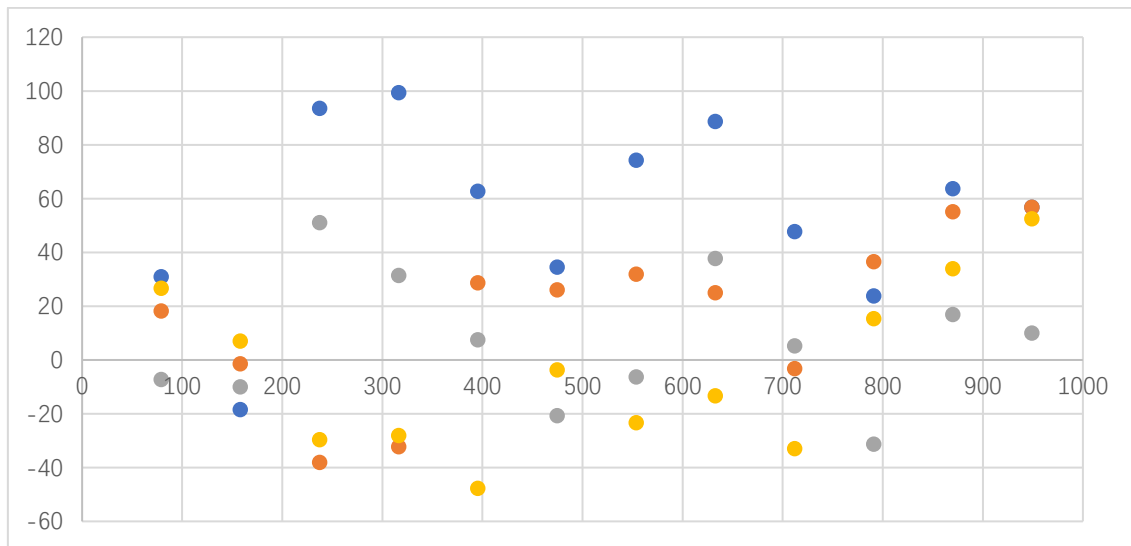


图 4-3 误差散点图

经过拟合后得出系数 $k = 42.46$ ， $b = 12.32$ 即测量得出压电陶瓷两端电压与产生位移关系满足式（4-1）



$$X = 42.46 \times U + 12.33 \quad (4-1)$$

式中：X——压电陶瓷产生的位移（nm）

U——压电陶瓷两端加的电压（V）

得出压电陶瓷的压电常数  $\varepsilon_0 = 42.46 \text{ nm/V}$ 。经过计算，记录的数据标准差大小为  $\delta = 29.36 \text{ nm}$ ，测量结果的线性拟合相关系数为 0.9957，由于该实验存在  $\pm \frac{\lambda}{8}$  的误差，因此可以计算得出该基于迈克尔逊干涉仪的位移测量系统的极限误差为下式（4-2）

$$e = \pm \left( \frac{\lambda}{8} + 2\delta \right) = \pm 137.82 \text{ nm} \quad (4-2)$$

式中：e——系统极限误差（nm）

$\lambda$ ——激光波长（632.8nm）

$\delta$ ——计算出的标准差大小（V）

由于本次实验使用的层叠式压电陶瓷额定电压为 150V，理论上最高只能产生  $6.4 \mu\text{m}$  的位移，实验条件限制，因此无法测量基于迈克尔逊干涉仪的位移测量系统在位移量较大时的误差和准确度。

## 4.3 系统误差分析与方法改进

### 4.3.1 系统误差分析

在干涉仪测位移系统中，理想的光源为强度和波长不变的单色平行光，但是 He-Ne 激光器输出的光源是高斯光束，而且由于供电存在 100Hz 的波动，其光强受其影响也存在同样的波动。光强不稳定会对细分和计数产生一定影响。而且 He-Ne 激光器输出的光源波长也并非常数，而是在小范围内波动，但测距的溯源依据又是激光波长，这又不可避免的会产生一定的误差。

测量的结果是 M2 镜在垂直激光方向产生的位移，由于安装精度，M2 镜不可避免的与激光产生一个小夹角，这会导致测量结果出现系统误差。由于存在加工精度，M2 镜片表面不可能做到完全水平，在镜片移动过程中，照射在 M2 镜上的光斑会产生微小移动，从而在垂直激光的方向上产生偏差。由于空气也有折射率，在空气中激光波长会发生改变，这也会带来误差。

除了光路因素外，电路系统也会引入误差。在理论上，照射在光电传感器上的激光强度不改变时，放大前的信号强度和放大后的信号强度理论上都应该是一个定值，但实测放大后信号，均存在很明显的拍频现象。放大前信号可能是由于光电二极管上的寄生电容与电路板上自然存在的寄生电容或电感，自然产生的出的高

频振荡。由于其存在高频信号，而在并联阻容后，信号的时间常数会变大，可能会导致无法对频率较高的信号进行计数。

电路细分也可能会引入误差。若想要细分过程不产生误差，需要保证两路相位差为严格的九十度，但其实只要两路光电传感器的信号相位差在  $0^\circ \sim 180^\circ$  的范围内，均可以完成细分，只是无法保证相位差不在九十度时测量结果的准确性。通过数学推导，可以简单得出，相位差越大，系统误差越大，最大可以达到激光波长的八分之一。

#### 4.3.2 下一步改进方法

将激光器，迈克尔逊干涉仪主体，光电转换与计数电路均设计在一个集成的盒子内理论上可以减少测量结果的误差，但由于迈克尔逊干涉仪在每次测量时均需要对 M1 与 M2 镜做出调整，因此实际达成此效果在设计上会比较困难，或者说在将整个测量系统集成起来的前提下，可以提高测量精度，但会较大幅度的提高生产成本。此外，通过将空气折射率考虑进测量结果也可以小幅度的提高测量精度。

系统最大的误差来源是电路部分。在将系统设计在黑盒子内时，理论上两个光电二极管信号之间的相位差可以做到比较精确的  $90^\circ$ ，而且可以更容易的将两路信号的幅值调节的一致，理论上电路部分的误差也可以消除极大部分。由于两路信号的相位差比较严格，更高倍数的细分技术也可以采用，这也可以带来更高的测量精度。

### 4.4 本章小结

本章阐述了记录实验数据的方法和过程，并给出了三组实验中记录的实验数据。随后对实验数据进行分析，得出测量的极限误差。系统设计的位移测量范围理论上可达到几百微米，但由于实验条件限制无法测试，对应的极限误差为  $137.82\text{nm}$ ，系统的分辨率为  $79.1\text{nm}$ ，测量结果的线性度为  $0.9957$ 。随后分析了导致误差产生的可能原因，并对一些产生误差的因素给出了可能的解决方法。

## 结 论

本文在深入研究迈克尔逊干涉仪原理的基础上，结合光电传感器与细分辨向技术，设计了一种以 He-Ne 激光器为光源的迈克尔逊干涉仪位移测量系统。设计了光电二极管对应的放大电路与整形电路，并设计了基于 STM32F103 单片机的下位机程序。目前，已经完成整个系统的设计测试与误差分析工作。

具体研究内容如下：

（1）首先阐述了迈克尔逊干涉仪测位移的基本原理，并推导了位移大小与干涉条纹变化之间的关系，还有干涉条纹变化与计数结果之间的关系，最终得出计数值与位移大小的函数关系。

（2）选择了合适的光电传感器与运算放大器，设计了合适的电流电压转换放大电路和作为整形电路的滞回比较器，并用 Proteus 对放大电路和整形电路进行了仿真测试。随后完成了电路板的设计与下位机的编写。

（3）搭建了测试系统使用的实物，使用制作完成的实物对压电陶瓷产生的位移进行测试和数据记录，最终分析得出测量使用的层叠式压电陶瓷的压电常数为 42nm/V。

（4）对测量结果进行了误差分析，得出系统的测量精度为  $\pm 138\text{nm}$ ，测量分辨率达到了  $\frac{\lambda}{8} = 79.1\text{nm}$ 。

本毕业设计虽然已经完成且实现了既定功能，但它还存在如下问题。

（1）在开机后，将干涉条纹调整到合适位置，随着放置的时间变长，干涉圆环中心会逐渐移动，若时间足够长，条纹的移动最终会导致两个光电传感器的相位差过大，导致细分辨向后的结果错误，从而导致计数结果错误。此现象严重时，相位差超过  $0-180^\circ$  时会导致无法计数，或干涉圆环中心偏离应处于中心的光电二极管时也会导致无法计数。

（2）由于 He-Ne 激光器使用的电源存在一百赫兹的波动，导致激光器发出的激光强度也存在一个一百赫兹的波动，这可能会导致测量结果出现误差。例如提前达到比较器跳变的阈值，或在负行程时滞后达到跳变阈值。

（3）是该装置的抗干扰性并不完美，系统只有在干涉圆环大小合适，即初始光程差大小合适时，且两个光电传感器位置合适时才能在外部震动的情况下正常计数，这显然并不理想。

（4）是随着压电陶瓷电压改变，干涉条纹中心也会不断移动，导致电压较大

时无法计数，因此未能完成较大范围内的数据记录和较大范围内测量线性度的验证。

上述具体问题的改进方案在 4.3 章节中给出了一部分，在今后的研究工作中可以针对这些问题，使用文中给出的方法对测量系统做出一定改进。

## 本科毕业论文（设计）诚信声明书

本人呈交给哈尔滨工业大学的学位论文，除所列参考文献和世所公认的文献外，全部是本人毕业设计期间在导师指导下的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

作者签名：

导师签名：

年 月 日

## 参考文献

- [1] 张莉, 杨伊凡, 荣振宇, 曲祥文, 蒋伊麦. 激光散斑法测量横向微位移及其应用[J]. 物理实验. 2019, 39(12): 11-14.
- [2] Frank Schneider, Jayanti Das, Benjamin Kirsch, Barbara Linke, Jan C. Aurich. Sustainability in Ultra Precision and Micro Machining: A Review[J]. Korean Society for Precision Engineering, 2019, 6(3): 601-610.
- [3] 王欢. 光纤调频连续波干涉温度传感器光学系统的研制[D]. 西安工业大学, 2019: 57-73.
- [4] 胡红波, 于梅. 零差激光干涉仪正交相位误差的分析[J]. 光电工程, 2012, (39)12: 55-62.
- [5] 李立艳, 吴冰, 苑勇贵, 魏勇, 杨军, 苑立波. 单频激光干涉仪非线性误差补偿方法研究[J]. 光学学报, 2011, 31(07): 246-252.
- [6] 段小艳, 任冬梅, 朱振宇, 李华丰, 兰一兵. 基于法布里-珀罗干涉仪的微位移测量方法研究[J]. 计测技术, 2013, 33(01): 23-25.
- [7] Lu Q, Wang C, Bai J, et al. Subnanometer resolution displacement sensor based on a grating interferometric cavity with intensity compensation and phase modulation[J]. Applied Optics, 2015, 54(13): 4188-4196.
- [8] Zhao B, Wang L, Xu ME, et al. A displacement measuring system based on grating double diffraction[J]. Proc 9th Int Symp on Precision Engineering Measurement and Instrumentation. 2015, 94-46.
- [9] 乔亮. 迈克尔逊干涉实验的仿真研究[J]. 重庆三峡学院学报. 2015, 31(03): 50-52.
- [10] V. Haan. First-order ether drift experiment with a Mach-Zehnder fiber interferometer [J]. Physics of Wave Phenomena, 2010, 18(03): 164-166.
- [11] 黄珍献, 刘跃, 贾光一. 基于迈克耳孙干涉光程差放大法的微小位移测量[J]. 大学物理, 2017, 36(06): 41-43.
- [12] 郑权, 赵岭, 钱龙生. 大功率二极管泵浦固体激光器的应用和发展[J]. 光学精密工程, 2001(9): 7-9.
- [13] 王斌. 差动式迈克尔逊干涉纳米位移测量方法研究[D]. 浙江理工大学, 2015.
- [14] 唐嘉鹏. 基于迈克尔逊干涉原理的微压力传感器设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020: 8-20.
- [15] Shaolin Xu, Tsunemoto Kuriyagawa, Keita Shimada, Masayoshi Mizutani. Recent advances in ultrasonic-assisted machining for the fabrication of micro/nano-textured

surfaces[J]. Higher Education Press,2017,12(1):33-45.

[16] 乔亮. 迈克尔逊干涉实验的仿真研究[J]. 重庆三峡学院学报. 2015, 31(03): 50-52.

[17] 金锋, 卢杨, 王文松, 张玉平. 光栅四倍频细分电路模块的分析与设计[J]. 北京理工大学学报. 2006(12):1073-1076.

## 致 谢

时间转瞬即逝。不知不觉中，大学四年的日子已经接近尾声，在思念的学习中我的收获颇多，而这些收获都需要他人的帮助。在着四年中我有过快乐，有过迷茫，也有过遗憾与不舍。

首先，我由衷的感谢导师任秀云对本人的悉心指导。从毕业设计使用的技术路线，到具体的设计方案，老师们都给了我莫大的帮助。其次我还要感谢光组的所有老师，特别是张延超老师。老师们在我的毕业设计遇到困难时给出了许多宝贵的建议，让我能够顺利完成实物设计与论文的编写。再次对任老师和光组其他老师表示衷心的感谢。

感谢实验室的研究生学长赵子达，他也给予了我许多帮助，例如告诉了我实验室元器件的摆放位置和实验室器件的使用注意事项。